



УДК 621.377.2

**АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СУБПИКСЕЛЬНЫХ КООРДИНАТ ТОЧЕЧНОГО ОБЪЕКТА****Н.В. ЩЕРБИНИНА***Белгородский государственный  
национальный  
исследовательский  
университет**e-mail:**shcherbinina@bsu.edu.ru*

Вычисление взаимной корреляции расфокусированного линзами бортовой оптико-электронной аппаратуры изображения и результата моделирования формирования изображения на борту с расфокусировкой на фокальной плоскости оптико-электронной аппаратуры спутника позволяет повысить точность определения значений координат местонахождения объекта на фокальной плоскости – матричном транспаранте в условиях превышения апертурами пикселей чувствительного транспаранта размеров отображаемого объекта по сравнению с промышленными методами вычисления центра тяжести пятна расфокусировки изображения малого, с субпиксельной апертурой, объекта.

Ключевые слова: функция рассеяния точки, изображение, пространственно-частотный спектр, функция взаимной корреляции, бортовая оптико-электронная аппаратура, апертура пикселя, субпиксельное разрешение, внутрисубпиксельный объект

Получаемые при многоспектральном дистанционном зондировании изображения, позволяют формировать улучшенные изображения с субпиксельным разрешением (повышение разрешения до 1,4-2 раз [1]) и, соответственно, повышать точность позиционирования распознаваемых объектов (в данной работе приведен только один из примеров реализации субпиксельного разрешения [1], хотя на современном этапе это одна из популярнейших технологий модернизации стволов космического зондирования Земли), но соответствующие технологии не затрагивают вопросы реализации улучшения точности позиционирования объектов, апертуры которых на фокальной плоскости бортовой оптико-электронной аппаратуры (БОЭА) или целиком вписываются в апертуры пикселей чувствительного транспаранта или даже рассматриваются как псевдоточки.

Расфокусировка на выходе БОЭА формируемого изображения в «разумных» пределах [2] создает ситуацию, при которой изображения объектов, будучи даже меньше по размерам апертур пикселей транспаранта, расплываются и засвечивают достаточно большие площадки на транспаранте (в работе [2] для такого случая в качестве ограничивающего глубину расфокусировки фактора используется состояние расфокусировки изображения, при котором еще восстанавливаются однозначно подавляемые на изображении верхние моды пространственно-частотного спектра). Вычислением центров тяжести образующихся при этом, как правило, гауссоподобных по распределению яркости пятен – отображений субпиксельных объектов можно достичь точности определения их координат (коррелируемых с энергетическими максимумами в исходных изображениях объектов), выражающиеся достаточно малыми долями апертур пикселей транспаранта – эта технология принята как базовая в навигационных системах, использующих в качестве входной информации изображения участков звездного неба и нередко используется в каждом «черно-белом канале» при формировании изображений по данным многоспектрального зондирования [3].

**Цель исследований:** построение модели вычислительного процесса с улучшенной по сравнению с промышленными методами вычисления «центров тяжести» точностью вычисления на фокальной плоскости БОЭА координат изображений объектов с субпиксельной апертурой для канала дистанционного зондирования.

Наиболее распространенный профиль функции рассеяния точки (ФРТ) в задачах навигации по звездам – гауссоподобный, более того, стоит рассмотреть принудительную расфокусировку также с использованием гауссоподобной ФРТ, при этом расфокусировка методом использования пространственно-частотных спектров осуществляется редуцированием спектра изображения оператором с гауссоподобным (по огибающей амплитудной составляющей) спектром тоже [4].



Очевидно, что центр тяжести при неоднородном распределении яркости на изображении объекта будет смещен к точке максимального значения яркости; это смещение систематическое и для большинства задач с позиционированием объекта с субпиксельной точностью (задач слежения, сопровождения, целеуказания, наведения, построения траектории движения и т.п.) вычисленный «внутрипиксельный» центр тяжести может считаться равноправным с классическим, т.к. лежит он на объекте.

Пятка гауссоподобного распределения яркости на дискретном транспаранте представляет собой неидеальный круг с пиксельно-ступенчатой по геометрии границей – круг засветки прямоугольных пикселей; параметры расфокусировки заданы и известны и, соответственно, известны пределы изменения индексов (номеров) пикселей, входящих в этот круг. Вопросы определения эффективного радиуса круга засветки пикселей (связанного с уровнем шума на изображении и частотой дискретизации изображения) и уровня радиометрического разрешения в системе, с целью подсчета и выделения пикселей, которые можно учитывать в формуле вычисления центра тяжести расфокусированного объекта, исследованы в задачах навигации по размытым изображениям звезд, задачах сопровождения удаленных точечных объектов, в том числе в работах [5,6,7].

При этом при расфокусировке проецируемого на матрицу чувствительных элементов изображения информация от «внутрипиксельного» элемента проецируется на «учитываемое» [8] количество чувствительных пикселей  $N$ , а положение центра тяжести задается отношением со взвешенным суммированием значений координат пикселей:

$$\sum \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} R_{x,y} / \sum R_{x,y} = \begin{Bmatrix} x_r \\ y_r \end{Bmatrix} \quad (1)$$

где  $\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix}$  – вектор координат пикселей, входящих в учитываемое количество  $N$  и пара значений координат вычисленного положения центра тяжести пятна, соответственно,  $R_{x,y}$  – значения яркостей соответствующих пикселей.

Пятка конуса расфокусировки от кляксоподобного или многосвязного по топологии изображения объекта характеризуется снижением эффективного радиуса на транспаранте, и снижением уровня его радиометрического разрешения над порогом отделения шумовой энергии на изображении, вплоть до срыва индикации объекта в системе наблюдения. В настоящей работе задача позиционирования таких сложных субпиксельных объектов не ставится.

Обнаружение наличия внутрипиксельного объекта наиболее вероятно при многоспектральном зондировании, когда огибающая (ступенчатая) яркостей вдоль оси номеров спектральных каналов «подозреваемого» на наличие малого объекта внутри апертуры пиксела отличается от аналогичной огибающей для окружающих пикселей, представляющих вдоль оси номеров каналов спектр подстилающей поверхности (как правило соответствующий сезонной карте спектров глобального землеобзора).

На основе вычисленной энергии возмущения спектрального портрета в области тестируемого пиксела целесообразно согласовывать параметры перестройки оптоэлектронной аппаратуры на расфокусирование изображения с установкой амплитудного порога для подавления шумовой по отношению к пятну информации [9] (причем смещение номера пиксела и окна обработки информации на многоспектральном паттерне от канала к каналу определяется по формуле для скорости движения изображения [10] с учетом времени отработки предыдущих каналов на сканирование зондируемой поверхности): используя модификацию формулы [9] для параметра  $PG$  квазипропорционального отношению "энергия шума/энергия сигнала", умноженному на величину  $\varepsilon = \tau / A$ , пропорциональную вероятности ложной тревоги в процедуре корреляционного обнаружения

$$PG = \frac{\Delta_p \cdot \sigma \cdot \varepsilon}{D_c \cdot \Omega}, (D_c, \Omega \neq 0); \quad (2)$$



здесь  $\sigma^2$  – среднеквадратичная дисперсия яркости исходного изображения;

$D_c$  – динамический диапазон контрастов выделяемых образов;

$\Omega$  – полоса пространственных частот, занимаемая спектральными портретами образов при предстоящей расфокусировке;

$\Delta_p$  – полоса пересечения пространственных частот спектральных портретов образов и шумов;

$\tau$  – радиус корреляции шума;

$A$  – средняя апертура пятна расфокусированного образа;

При этом величина  $\varepsilon = \tau / A$  нормирует отношение  $\Delta\sigma / D_c \Omega$  так, что при выборе для позиционирования объектов, для которых  $\varepsilon \ll 1$  она удерживает значения  $PG \leq 0.3$ . Это эквивалентно значению вероятности ошибки в идентификации возмущения спектра  $< 0.3$  и служит указанием на выбор глубины расфокусировки.

Из всех приведенных параметров в формуле (2) наиболее труднодоступен в оценке параметр  $\Delta_p$ . Для оценки  $\Delta_p$  следует на окне изображения, содержащем образ и шум, запустить процедуру веерной фильтрации с перебором длин баз фильтрации  $L$  в сторону их увеличения. При этом значение  $L_0^{-1}$ , при котором накапливающий функционал веерного фильтра показывает начало устойчивого выделения регулярных составляющих изображения можно принять с высокой степенью достоверности за левую границу полосы частот шумов, тогда легко можно найти  $\Delta_p$ :

$$\Delta_p = \Omega - L_0^{-1} \quad (3)$$

Вычисления по правилу логарифмической производной от выражения (1) дают оценку относительной погрешности позиционирования объекта в виде:

$$|\Delta V / V| + |\Delta D / D| = \left| \Delta \left\{ \begin{matrix} x_r \\ y_r \end{matrix} \right\} / \left\{ \begin{matrix} x_r \\ y_r \end{matrix} \right\} \right|, \quad (4)$$

где  $|\Delta V / V|$  – модуль относительной погрешности, полученный по правилу логарифмической производной,  $V$  – числитель левой части выражения (1),  $|\Delta D / D|$  – модуль относительной погрешности, полученный по правилу логарифмической производной,

$D$  – знаменатель левой части выражения (1),  $\left| \Delta \left\{ \begin{matrix} x_r \\ y_r \end{matrix} \right\} / \left\{ \begin{matrix} x_r \\ y_r \end{matrix} \right\} \right|$  – модуль относительной

погрешности от вычисленных координат центра тяжести. Для современных ОЭП на основе ПЗС величина относительной погрешности вычисления координат центров тяжести для  $N=16-32$ , имеет значение от 0.003 до 0.01. Интервал абсолютных погрешностей, измеряемых в мкм, определяется в худшем случае произведением приведенных относительных погрешностей на апертуру (от 8 мкм) пиксела используемой матрицы приборов с рядовой связью (ПЗС).

После оценки погрешности позиционирования субпиксельного объекта (по отслеженным пикселям в каналах), можно ставить задачу улучшения выбранной оценки в используемом канале.

Для чего с первичным, нерасфокусированным изображением вычисляется свертка с вычисленной гауссоподобной ФРТ расфокусировки – создается модель прямой задачи формирования изображения для позиционирования субпиксельного объекта, причем, и это самое существенное, когда в этой модели индексы смещения при свертке попадают на

тестируемый пиксел в пределах области  $\left[ 0.99 \left\{ \begin{matrix} x_r \\ y_r \end{matrix} \right\}, 1.01 \left\{ \begin{matrix} x_r \\ y_r \end{matrix} \right\} \right]$ . Синтезированное

изображение с учетом перебора внутрипиксельных положений объекта сравнивается с полученным при реальной расфокусировке изображением в окне обработки. На полученных результатах сравнения ищется минимум меры разности (минимум меры Хемминга – суммы квадратов разностей соответственных пикселей сравниваемых изображений) или максимум всплеска функции взаимной корреляции, что по порядку



величины погрешности эквивалентно [11,12] и определяет координаты объекта на фокальной плоскости с субпиксельной точностью.

Функция взаимной корреляции (ФВК) в описываемых окнах вычисляется в виде:

$$R(\xi, \eta) = \frac{\iint [S_{IO}(x, y) - S_{IO}] [S_{OO}(x - \xi, y - \eta) - S_{OO}] dx dy}{(\iint [S_{IO}(x, y) - S_{IO}]^2 [S_{OO}(x - \xi, y - \eta) - S_{OO}]^2 dx dy)^{1/2}}, \quad (5)$$

где  $S_{IO}(x, y)$  – контраст в окне синтезированного изображения-эталона,  $S_{OO}(x, y)$  – контраст в окне расфокусированного реально изображения – опорного ориентира,  $S_{IO}$  и  $S_{OO}$  – матожидания контраста в соответствующих окнах, интегрирование выполняется по апертуре окон.

Если необходимо поднять точность описываемого позиционирования в  $T$  раз, то выбирается параметр  $K = (4-10)T$  (значения  $K > 10T$  нереальны в силу неразличимости значений ФВК при взаимных сдвигах коррелянтов, выходящих по малости за пределы, устанавливаемые высшей спектральной гармоникой изображения, регламентируемой теоремой Котельникова) и указанное окно разбивается равномерно на  $K^2$  субпикселей следующего порядка малости. Такое увеличение точности субпиксельного позиционирования вызывается, к примеру, решением задач сопровождения сильно удаленных (точечных) космических объектов, когда субпиксельное смещение их на транспаранте вызывается реальным смещением их в сотни и тысячи километров. Далее находится аппликата максимума нормированной ФВК, удовлетворяющая неравенство  $PG < 0.3$ , или при отсутствии явного максимума интервал делится пополам по ОХ и ОУ, строятся по два прямоугольных импульса по оси ОХ и ОУ с общей высотой – упомянутой аппликацией (эти импульсы представляют собой характеристические функции принадлежности позиционируемого объекта интервалу) и каждый из созданных импульсов укорачивается по протяженности слева и справа, соответственно, по направлению к положению выделенной аппликаты  $\mu$ - (или  $\nu$ -) фильтром, пока не начнет нарушаться неравенство  $PG < 0.3$ .  $\mu$ - (или  $\nu$ -) фильтры, сжимая импульс ухудшают соотношение сигнал/шум в соответствии с линейной зависимостью от увеличения ширины  $\Delta p$  – полосы пересечения пространственных частот спектральных портретов укороченных  $\mu$ - (или  $\nu$ -) фильтрами импульсов и шумов, определяя значения «левого» и «правого» концов интервалов погрешности позиционирования объекта с предположением, что координаты его вычисляются полусуммой значений координат найденных новых концов интервала.

Оценим полезное расширение пространственно-частотного спектра (ПС) импульсов при  $\mu$ - (или  $\nu$ -) фильтрации с первоначальной полосой  $\Omega$ . Пусть  $\Omega_1$  – новая полоса или верхняя мода ПС (т.к. полоса в данном случае отсчитывается от 0) после фильтрации. Восстановление этой частоты означает обеспечение промаха ее идентификации на уровне, не превышающем 0.3. Исходя из того, что для данной модели имеется два импульса, то при вычислении указанной выше полусуммы соотношение «маскирующая измерения дисперсия»/ «полезная регулярная составляющая» при суммировании снижается в  $\sqrt{2}$  раз с высокой степенью вероятности (классический вывод статистической радиотехники). Полагаясь на худший случай до фильтрации и вычисления полусуммы, можно записать два граничных равенства  $PG = \frac{\Delta_p \sigma \varepsilon}{D_c \Omega} = 0.7$  и  $PG_1 = \frac{\Delta_p \sigma \varepsilon}{\sqrt{2} D_c \Omega_1} = 0.3$ . Из этих равенств следует

$$\frac{\Omega_1 \sqrt{2}}{\Omega} = \frac{7}{3}. \text{ Откуда}$$

$$\Omega_1 = 1,65 \Omega. \quad (6)$$

На расширение спектра импульсов большее, чем 1.65, т.е. улучшение оценки позиционирования, большее, чем 1.65 нет оснований рассчитывать, поэтому примем эту цифру как показатель улучшения точности позиционирования объекта.

На рисунке представлен пространственно-частотный спектр импульса, полученного по обсуждаемой ФВК на модели позиционирования субпиксельного объекта – яркого пиксела, сдвинутого на три субпиксела вправо и три – вниз внутри исходного пиксела



изображения разбитого на 10x10 субпикселей. Хорошо виден соответствующий сдвиг вправо и вверх первой пространственной гармоники сжатого  $\mu$ -фильтром импульса на уровне идентификации около 0.7 на фоне шумовых гармоник.

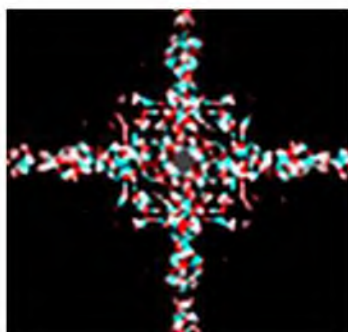


Рис. Спектральное представление позиционирующего импульса субпиксельного объекта

### Выводы

Метод корреляционного сравнения реального текущего расфокусированного изображения и результата моделирования формирования на борту изображения с расфокусировкой на фокальной плоскости оптико-электронной аппаратуры спутника позволяет повысить точность определения значений координат местонахождения субпиксельного объекта на фокальной плоскости  $\mu$ - (или  $\nu$ -) фильтрацией построенных прямоугольных всплесков на вычисленной ФВК по сравнению с прямыми вычислениями центров тяжести расфокусированных фигур не хуже чем в 1,65 раза.

### Список литературы

1. Москвитин А.Э. Технологии и алгоритмы повышения качества изображений земной поверхности на основе комплексирования спектрозональной информации. Диссертация на соискание уч. степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01. Рязань. 2003г. – 130 с.
2. Vintaev V.N., Urazbakhtin A. I., Ushakova, N. N. The Criterion of Admissibility of the Required Resolution Degradation of Images Synthesized by Some Radio Systems. Telecommunications And Radio Engineering , Vol. 64 2005, Begell House, Inc., New York, 315-319 pages.
3. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений/ Р.А. Шовенгердт. Москва, «Техносфера», 2010, 560 с.
4. Стрыгин Н.З., Сухов П.П., Карпенко Г.Ф. О корректности задач телевизионных измерений при наблюдениях ИСЗ, «Околоземная астрономия–2005» , РАН ИНАСАН, Казань, 2005, с. 301–305.
5. Groth E.J. A Pattern Matching Algorithm for Two-Dimensional Coordinate Lists, “The Astronomical Journal”, v. 91, № 5, May, 1986, p.p. 1244–1248.
6. Hufnagel R.E. and Stanley N.R. “Modulation Transfer Function Associated with Image Transmission through Turbulent Media”, Journ. Opt. Soc. Amer.; Vol. 54, pp. 52-61, Jan. 1964.
7. Прокофьева-Михайловская В.В., Стрыгин Н.З., Сухов П.П., Карпенко Г.Ф. Некоторые современные проблемы создания астрономических телевизионно-измерительных систем (АТВИС) для наблюдений за ИСЗ. Известия КраО. Т. 103, №3, 2007, с. 238
8. Блажевич С.В., Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н., Селютина Е.С. Автоматическое выделение и сопровождение псевдоточечных мерцающих объектов в реальном времени – модель фоноцелевой обстановки, алгоритм работы бортового процессора и технические решения по процессору. – Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2010: Труды научно-технической конференции-семинара. Вып. 4/ Под ред. Р.Р. Назирова. – М.: КДУ, 2011., стр.132-139.
9. Ушакова Н.Н. Коррекция цифровых космических изображений на основе верифицирующего моделирования. – Дисс. на соискание ученой степени канд. техн.наук.- Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2004. – 255 с.
10. Жиленев М.Ю., Винтаев В.Н. Формула расчета движения изображения при орбитальной съемке планет оптико-электронной аппаратурой /Телекоммуникации (Telecommunications) - М.:Наука и технологии, № 7, 2011, с.2-7.
11. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Советское радио, 1966, 677 с.



12. Константинов И. С., Щербина Н. В., Жилнев М. Ю., Винтаев В. Н., Ушакова Н. Н. Модернизация процедуры цифровой коррекции возмущений в изображениях, формируемых панхроматической оптико-электронной съемочной аппаратурой космического аппарата «Монитор». // Научные ведомости БелГУ. Сер. Информатика. – 2013. – № 8 (151). – Выпуск 26/1. – С. 194-200.

## ALGORITHM FOR OF DETERMINATION SUBPIXEL COORDINATES OF POINT TARGETS

**N.V. SHCHERBININA**

*Belgorod National  
Research University*

*e-mail:  
shcherbinina@bsu.edu.ru*

Calculation of the cross-correlation -focus lenses board optical electronics and image simulation result imaging on board with the defocus on the focal plane of the optical-electronic satellite equipment can improve the accuracy of determination of the coordinates for the location of the object on the focal plane – the matrix transparency in conditions exceeding the pixel aperture sensitive display banner sizes object compared to industrial methods calculate the center of gravity of the spot image defocusing small , with sub-pixel aperture , the object.

Keywords: point spread function, image, spatial-frequency spectrum, cross-correlation function, on-board optic electronic devices, aperture pixel, sub-pixel resolution, to intropiksel.